基于TVDI的近20 a吐鲁番市干旱及影响因素分析

周孝明， 张 喆， 张 越， 王侯凝

（新疆大学地理与遥感科学学院，新疆 乌鲁木齐 830017）

摘 要： 全球温室效应加剧背景下，干旱监测对保障区域的生态安全、经济发展以及农业生产具有重要的指导意义。近年来，由于吐鲁番市自身地理位置、气候变化以及水资源短缺，其干旱问题愈发显著，阻碍了其自身以及周边地区社会经济的长期、稳定发展。基于2001—2022年的MODIS归一化植被指数（NDVI）和地表温度（LST）数据建立温度植被干旱指数（TVDI）模型，利用趋势分析、M-K趋势检验、地理探测器等方法揭示了吐鲁番市近20 a的干旱时空变化及特征、干旱演变规律并探讨了不同因素（气温、降雨量、潜在蒸散发、土地覆被类型、人口密度、高程、坡度）对TVDI的影响。结果表明：（1）吐鲁番市干旱区TVDI空间分布区域特征明显，自北向南呈逐渐递增趋势，吐鲁番市总体呈现干旱化加剧，其中有89.6%的区域TVDI呈现显著增加，仅有3.5%的区域为干旱程度未有加剧。（2）TVDI年际变化表明，吐鲁番市近20 a来的干旱程度呈增加趋势，TVDI月际变化呈明显季节差异，总体表现为春季>秋季>夏季。（3）单因素监测结果表明，吐鲁番市干旱变化趋势影响比重最大因素分别为潜在蒸散发、气温和高程；多因素交互作用下，潜在蒸散发与高程、气温、降水以及土地覆被因素相互作用共同驱动干旱化的发生为当地制定干旱防治措施、提高处理生态隐患和地缘风险的能力提供理论依据。

关 键 词： 干旱；温度植被干旱指数（TVDI）；趋势分析；地理探测器；吐鲁番市

文章编号： 1000-6060(2024)12-2104-11(2104~2114)

干旱是一种因缺乏连续性降雨而导致的气象灾害[1]。对比洪涝以及飓风等极端气象灾害，干旱具有持续时间长、波及范围广的特征，对农业发展、生态环境系统以及人类居住环境造成较为严重的威胁，特别是在生态结构单一，修复能力较弱的干旱和半干旱地区[2]。因此，针对干旱情况的监测与空间结构分布的研究，对于掌握干旱趋势变化，合理分配水资源以及促进未来社会经济持续稳步增长有着重要意义。

近年来，国内外学者在干旱监测工作方面有着重要进展。常用的干旱监测指标如Rouse等[3]提出的归一化植被指数（NDVI）以及在此基础上，Sandholt等[4-6]提出的温度植被干旱指数（TVDI）。此外，其他用于评价气象干旱的指标有帕尔默干旱严重指数（PDSI）[7-9]、标准化降水指数（SPI）[10]和标准化降水蒸散指数（SPEI）[11]等。武彬[12]通过VIIRS数据建立了TVDI模型；于维等[13]以MODIS-TVDI和GNSS-PWV数据为研究基础，通过相关以及回归分析等方法探究干旱区干旱时空特征；余灏哲等[14]采用多元回归模型结合热带降雨量测量卫星（TRMM）数据降尺度和MODIS数据构建综合干旱指数；Liu等[15]结合多元线性回归方法从而建立综合干旱指数（MCDIs）；Zhang等[16]通过主成分分析方法建立的综合干旱监测指数（CDMI）。基于遥感数据的温度-植被干旱指数TVDI，作为一种简化的NDVI-LST三角和梯形特征空间的模型，可以较好地实现干旱半干旱地区干旱监测。

尽管当前已有研究使用TVDI指数研究干旱区

收稿日期： 2024-04-16； **修订日期：** 2024-05-15

基金项目： 国家自然科学基金项目（42061066）；校级大学生创新训练计划项目（XJU-SRT-23014）资助

作者简介： 周孝明（2001-），男，硕士研究生，主要从事干旱区资源环境遥感应用. E-mail: 13981435165@163.com

通讯作者： 张喆（1988-），女，博士，副教授，主要从事干旱区资源环境遥感应用. E-mail: zhangzhe_0110@ yeah.net

干旱变化，但是以TVDI指数作为干旱区监测研究所选取的遥感影像产品数据期数较短，对研究区长时间序列干旱动态监测的研究相对不足，针对于吐鲁番市典型干旱地区植被生长期连续动态干旱监测过程的研究较少。再者，在对吐鲁番市干旱分布与变化及其影响因素分析研究中，多数侧重于分析其气象因素，对高程等地形因素所造成干旱影响有所忽略，需要进一步的研究探讨[4]。为此，基于当前学者的干旱监测研究和影响因素分析的相关成果，结合吐鲁番市当地干旱状况，本研究以吐鲁番市2001—2022年MODIS产品MOD11A2、MOD13A2 NDVI利用TVDI对过去近20 a间吐鲁番市全年以及植被生长期（4—10月）进行干旱监测分析，采用Sen趋势分析以及M-K显著性检验，分析过去近20 a吐鲁番市干旱时空变化趋势，并对其今后干旱发展变化进行预测；采用GIS技术、地理探测器等方法，探讨吐鲁番市干旱形成的影响因素，并对结果进行研究分析，进一步揭示吐鲁番市2001—2022年全年以及植被生长季内干湿变化时空演化特征，为当地制定干旱防治措施，提高处理生态隐患和地缘风险的能力提供理论依据。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

吐鲁番市地处中国西北地区，新疆维吾尔自治区中东部，天山东部山间盆地（41°12′~43°40′N，87°16′~91°55′E）。该区总面积70049.03 km²，占新疆土地总面积的4.2%，是全国地势最低、夏季气温最高的地方，大部分地面在海拔500 m以下[17]，地形中间低、四周高，北部地区海拔可达4000 m以上（图1）。吐鲁番市太阳光照较强，降水较少。该地区气候以大陆性荒漠气候类型为主，地处盆地，四周高山阻隔了其与海洋之间的大气循环。该地区受地形及地理位置的影响，降水主要表现为从北向南递减，且年降水量均在31.5 mm以下。

1.2 数据来源

本研究所用的地表温度指数（LST）和NDVI来自美国宇航局NANS网站上的Terra卫星多源遥感产品（http://ladsweb.nascom.nasa.gov）。LST空间分辨率为1 km，时间分辨率为8 d[18]。NDVI空间分辨率为1 km，时间分辨率为16 d。数字高程DEM数据来源于CGIAR CSI（http://srtm.csi.cgiar.org/download），空间

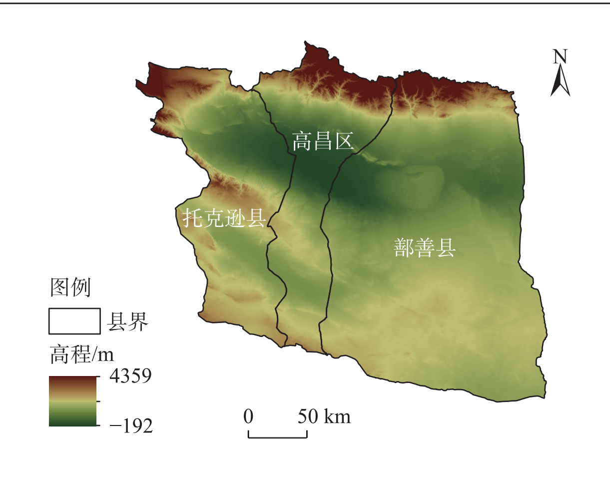


图1 研究区示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the research area

分辨率为30 m，坡度数据基于DEM数据，利用ArcGIS 10.8软件进行提取。人口密度数据来自LandScan人口密度数据集（https://www.satpalda.com/product/landscan/）。

降雨量(https://doi.org/10.5281/zenodo.3185722.)、气温（https://doi.org/10.11888/Meteoro.tpdc.270961.）和潜在蒸散发数据（https://doi.org/10.11866/db.loess.2021.001.）来源于国家青藏高原科学数据中心发布的中国逐月平均气候数据集。

中国土地覆被数据集CLCD（https://zenodo.org/record/8176941），该数据集经过可视化解释、随机森林分类、空间-时间过滤和逻辑推理相结合的处理方法后得到的年度高分辨率土地覆被数据[19]，分辨率为30 m，数据格式为TIF。CLCD在现有的年度土地覆被产品方面具有更高的空间分辨率和更长的时间覆盖，并且基于5463个独立的测试样品，CLCD的整体准确性达到79.31%[20]。

1.3 研究方法

1.3.1 *数据预处理* 利用Google Earth Engine平台，基于Python环境，筛选研究时间及区域，调用MODIS中NDVI和LST数据集，通过去云函数剔除异常值；利用时间序列线性插值和Savitsky-Golay滤波方法消除低质量值和缺失值，通过ArcGIS 10.8软件自定义脚本工具，将月份相同的16 d分辨率NDVI数据以最大合成法（叠置像元求最大值）处理，8 d分辨率的LST数据像元统计求平均值合成，得到NDVI和LST的月均以及年均数据。

1.3.2 *T_s-NDVI模型* NDVI指数是近红外波段与红光波段差值与其和之比，其范围为（−1，1）[21]，较好

反应植被丰富度。比值越大植被覆盖度也就越高，岩石或裸土等近红外与红光反射近似相等的地物NDVI近似等于0，即植被覆盖度很低[22]。Sandholt等[4]在研究土壤湿度时，构建了地表温度–植被指数特征空间，并回归拟合了干、湿边方程，提出温度植被干旱指数，定义为：

$$\mathrm{TVDI}=\frac{T_s-T_{smin}}{T_{smax}-T_{smin}} \quad (1)$$

$$干边方程：T_{smax}=a_1+b_1\times \mathrm{NDVI} \quad (2)$$

$$湿边方程：T_{smin}=a_2+b_2\times \mathrm{NDVI} \quad (3)$$

式中：a_1、b_1和a_2、b_2分别为干边方程和湿边方程的截距、斜率；T_s为陆地地表温度，T_{smax}、T_{smin}分别为相应NDVI指数下的最高陆地地表温度和最低陆地地表温度。TVDI的取值为(-1, 1)，能反映地表土壤的干湿状况[23]。TVDI值上升，土壤湿度降低，所在地区越干旱，反之则越湿润。

1.3.3 趋势分析法 对2001—2022年吐鲁番市TVDI采用趋势分析法，可以模拟出变化趋势，计算公式[24]为：

$$\theta_{\mathrm{Slope}}=\frac{n\times\sum_{i=1}^{n}\left(i\times \mathrm{TVDI}_i\right)-\sum_{i=1}^{n}i\sum_{i=1}^{n}\mathrm{TVDI}_i}{n\times\sum_{i=1}^{n}i^2-\left(\sum_{i=1}^{n}i\right)^2} \quad (4)$$

式中：θ_{Slope}为一元线性回归方程的斜率；n为累计年数，n=22；TVDI_i为第i年生长季干旱指数。当$\theta_{\mathrm{Slope}}>0$时，表示干旱程度加剧；当$\theta_{\mathrm{Slope}}=0$时，表示干旱程度无显著变化；当$\theta_{\mathrm{Slope}}<0$时，表示干旱程度减低。将TVDI空间变化趋势与Mann-Kendall检验结合，可以将TVDI趋势变化分成5个等级：当$\theta_{\mathrm{Slope}}<0$，$P<0.01$时，呈显著减少变化趋势；当$\theta_{\mathrm{Slope}}<0$，$0.01<P<0.05$时，呈不显著减少变化趋势；当$\theta_{\mathrm{Slope}}>0$，$P<0.01$时，呈显著增加变化趋势；当$\theta_{\mathrm{Slope}}>0$，$0.01<P<0.05$时，呈不显著增加变化趋势；当$P>0.05$时，呈无显著变化趋势。

1.3.4 地理探测器模型 地理探测器是通过空间异质性来探测因变量与自变量之间分布格局的一致性[25]，可分为因子探测、交互探测、生态探测和风险区探测[26–27]。本研究采用因子探测器和交互探测器2种方法，基于R语言的GD库实现地理探测器的应用，并将降雨量、气温、潜在蒸散发、高程、坡度、土地利用类型和人口密度7个连续变量采用几何间隔法自动进行离散化以满足模型的使用条件。

(1) 因子探测器：探测因变量的空间分层异质性，并探测因变量在空间分布的差异与自变量因果联系，同时给出其影响程度大小，并由q值大小进行反应。计算公式如下：

$$q=1-\frac{1}{N\sigma^2}\sum_{h=1}^{L}N_h\sigma_h^2 \quad (5)$$

式中：h为对吐鲁番市干旱程度以及划分的影响因素的类型；N_h为在h影响因素层所含有单元个数；N为吐鲁番市研究区中所含有的单元个数总数；σ_h^2为影响因素在某一层的h方差，而σ^2则表示全区方差。q的取值为[0, 1]，其值越大，表明自变量对因变量的影响程度越强。

(2) 交互探测器：对于2个影响因子共同作用进行探究，设因子分别为X_1、X_2，分别计算2个因子对Y的q值$q(X_1)$、$q(X_2)$，然后计算2个图层相切时Y的q值$q(X_1\cap X_2)$，最后比较$q(X_1)$、$q(X_2)$和$q(X_1\cap X_2)$的关系。其关系可以被分为五类，当$q(X_1\cap X_2)<\min[q(X_1),q(X_2)]$时，交互作用为非线性减弱；当$\min[q(X_1),q(X_2)]<q(X_1\cap X_2)<\max[q(X_1),q(X_2)]$时，为单因子非线性减弱；当$q(X_1\cap X_2)>\max[q(X_1),q(X_2)]$时，为双因子增强；当$q(X_1\cap X_2)=q(X_1)+q(X_2)$时为独立；当$q(X_1\cap X_2)>q(X_1)+q(X_2)$时为非线性增强。

1.3.5 制图方法 基于2001—2022年逐月NDVI和LST数据，利用ENVI 4.8软件计算2001—2022年逐月以及逐年TVDI值，并将TVDI数据导入到ArcGIS 10.8软件中，按照TVDI值范围进行重分类，划分干旱程度等级，得到年际变化尺度以及月际变化尺度的干旱程度分布图，同时利用Python语言基于TVDI数据进行Sen+Mann-Kendall趋势分析，所得栅格数据在ArcGIS软件中处理并得到干旱变化趋势分布图。

本研究中所有柱状图以及折线图基于研究内容中栅格数据通过Excel 2018软件转化为表格形式，并导入Origin 2019软件完成。

2 结果与分析

2.1 T_s-NDVI特征空间及干湿边拟合方程

基于吐鲁番市2001—2022年均NDVI和LST数据，利用Python逐年对研究区内每一个NDVI像元进行0.01步处理，找出NDVI相差0.01间隔内所有像元的地表温度最大值和最小值（表1）。由此构建2001—2022年各年年均T_s-NDVI特征空间以及地表

表1　2001—2022年吐鲁番市年均T_s-NDVI特征空间干湿边拟合方程及相关系数

Tab. 1　Fitting equations and correlation coefficients of dry and wet edges in Turpan City annual average T_s-NDVI feature space from 2001 to 2022

年份	拟合干边公式	R^2	拟合湿边公式	R^2
2001	T_s=51.1−41.1NDVI	0.85	T_s=3.97+74.6NDVI	0.75
2002	T_s=52.6−41.6NDVI	0.87	T_s=5.37+61.6NDVI	0.73
2003	T_s=54.4−43.3NDVI	0.86	T_s=3.11+75.0NDVI	0.77
2004	T_s=53.9−41.5NDVI	0.83	T_s=6.00+64.6NDVI	0.75
2005	T_s=53.2−38.5NDVI	0.89	T_s=3.05+65.5NDVI	0.78
2006	T_s=51.1−36.6NDVI	0.81	T_s=5.32+62.6NDVI	0.75
2007	T_s=51.1−36.7NDVI	0.86	T_s=4.48+56.9NDVI	0.68
2008	T_s=52.5−38.1NDVI	0.75	T_s=4.72+59.4NDVI	0.71
2009	T_s=52.1−37.4NDVI	0.87	T_s=4.90+56.8NDVI	0.67
2010	T_s=50.5−38.3NDVI	0.85	T_s=3.48+68.3NDVI	0.78
2011	T_s=51.8−37.4NDVI	0.84	T_s=3.68+69.7NDVI	0.75
2012	T_s=52.2−34.8NDVI	0.83	T_s=4.15+66.9NDVI	0.79
2013	T_s=53.0−37.0NDVI	0.86	T_s=3.95+54.6NDVI	0.69
2014	T_s=52.2−39.2NDVI	0.85	T_s=4.62+54.7NDVI	0.57
2015	T_s=52.3−35.1NDVI	0.88	T_s=2.06+65.8NDVI	0.74
2016	T_s=53.0−35.0NDVI	0.85	T_s=4.79+57.7NDVI	0.73
2017	T_s=52.7−33.5NDVI	0.86	T_s=3.76+63.9NDVI	0.77
2018	T_s=52.6−38.4NDVI	0.89	T_s=3.50+62.8NDVI	0.74
2019	T_s=51.7−35.5NDVI	0.78	T_s=4.56+56.5NDVI	0.71
2020	T_s=53.4−36.9NDVI	0.90	T_s=2.44+63.0NDVI	0.72
2021	T_s=54.0−36.5NDVI	0.81	T_s=4.06+58.7NDVI	0.76
2022	T_s=54.2−37.6NDVI	0.88	T_s=5.41+59.0NDVI	0.71

注：NDVI为植被覆盖指数；T_s为地表温度；R^2为决定系数。

TVDI，并对其进行回归分析。

从表1看出，在T_s-NDVI特征空间上，对干边、湿边界方程进行线性拟合，其特征变化显著。最高气温与最低气温之差随NDVI的增加而减小，最高气温与最低气温之差与NDVI之间近似线性关系，干边斜率均小于0，而湿边斜率大于0。温差越大，则越干燥，反之，则越湿润。

2.2　干旱空间分布特征及变化趋势

2001—2022年期间吐鲁番市TVDI均值空间分布呈显著的区域分异特征（图2a），吐鲁番市北部与西部相对湿润，中部向东南部干旱不断延展，吐鲁番市近20 a TVDI均值为0.81，整体呈现重旱状态，较为湿润的地区分布在吐鲁番市北部的博格达山山麓地区以及西部的阿拉山沟口的托克逊县西部，中部高昌区以及东部鄯善县地区干旱较为严重。

利用线性回归方法和Mann-Kendall显著性检验方法，对各地区TVDI的年际变化趋势进行统计分析，结果表示（图2b）：2001—2022年托克逊县、高昌区以及鄯善县的TVDI均有上升趋势，区域干旱化差异较大。自2001年来，吐鲁番市总体TVDI均以显著增加为主，而在偏中部以不显著增加为主，少数区域是不显著减小的，近89.6%的区域TVDI呈现显著增加，近6.9%的区域TVDI表现为不显著增加，仅有近3.5%的区域未出现干旱近一步加剧的状态。针对这近3.5%区域出现的结果，通过对吐鲁番市地理位置以及人口分布的分析，此地区主要为吐鲁番市区以及自然景观保护区，由于当地政府对于吐鲁番市农业结构的转变以及对于土地利用类型的调整，将部分耕地转变为林地以及草地，使得当地部分区域并未出现进一步干旱加剧[28]。

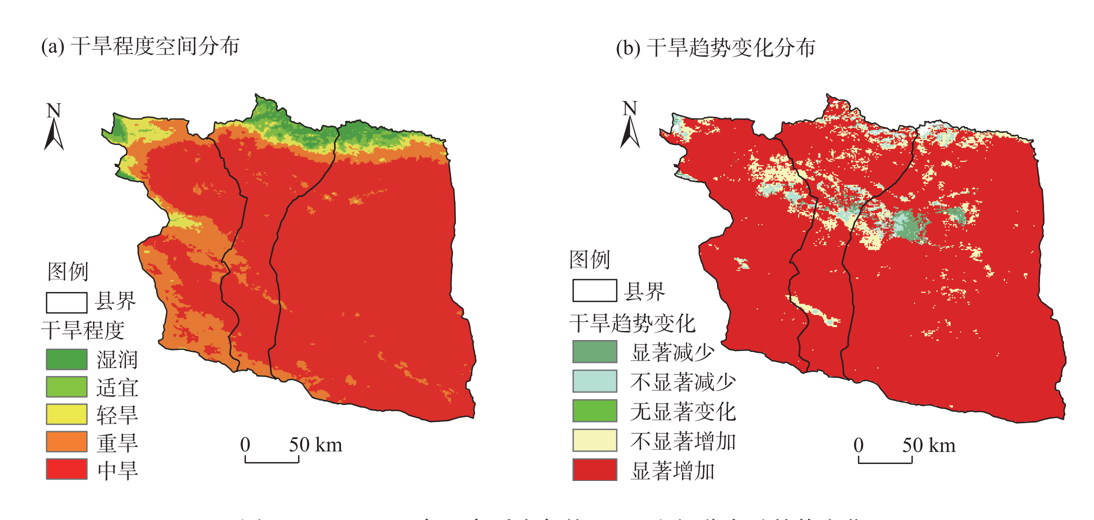


图2　2001—2022年吐鲁番市年均TVDI空间分布及趋势变化

Fig. 2　Spatial distribution and trend of annual average TVDI in Turpan City from 2001 to 2022

2.3 2001—2022年TVDI年际变化趋势分析

参考齐述华等[29]的划分标准，将2001—2022年吐鲁番市TVDI值进行划分不同等级。图3较为明显反映出过去近20 a吐鲁番市干旱的年际变化状况，吐鲁番市干旱分布明显，呈现整体干旱和部分区域严重干旱特征，中部以及东南部地区干旱程度较为严重，干旱面积占比较大，整体呈干旱加剧变化情况，并且呈现北部向南部加剧，西部向东部干旱严重化。

通过对吐鲁番市TVDI（图4a）的年际变化曲线

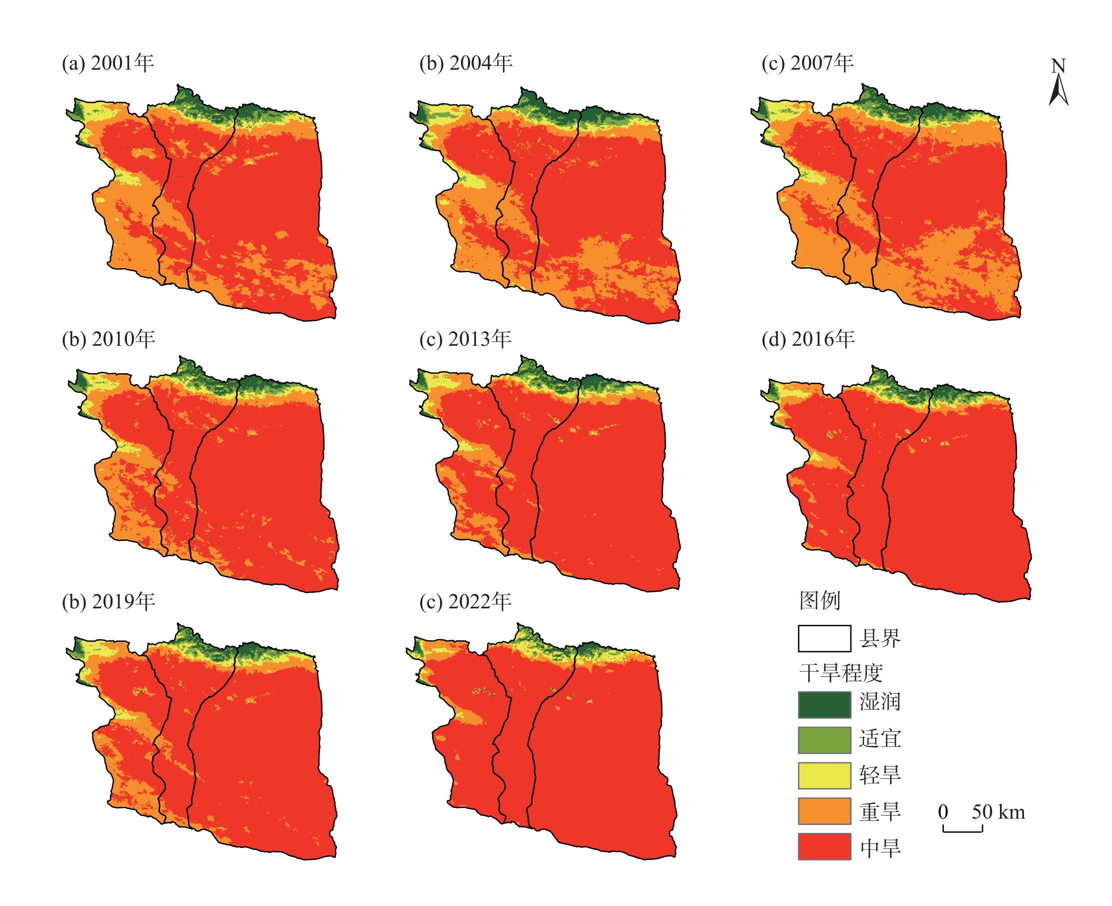
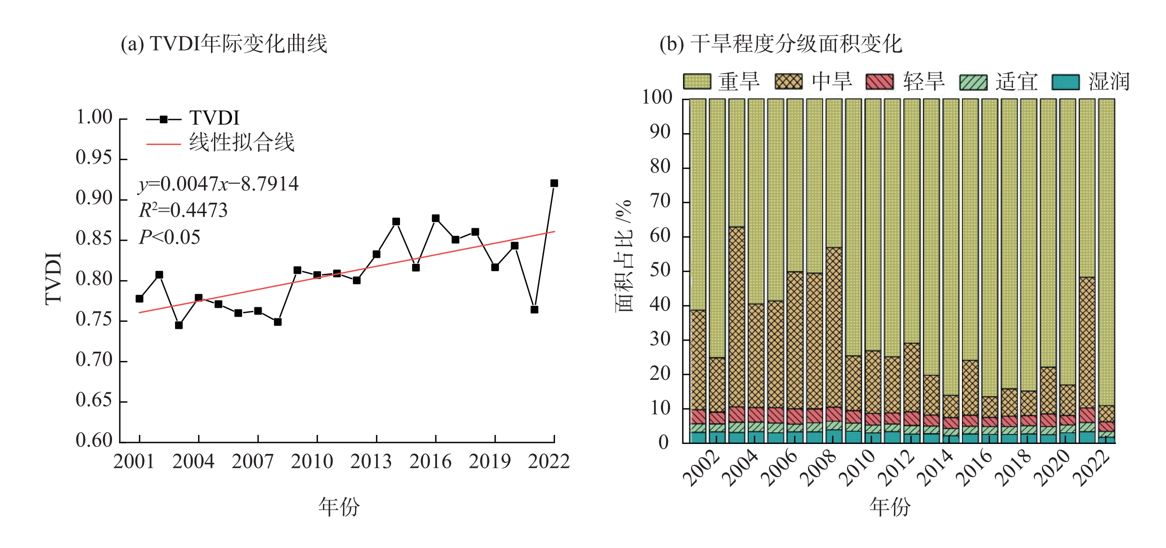


图3 2001—2022年吐鲁番市年际TVDI空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of annual TVDI in Turpan City from 2001 to 2022



注：TVDI为植被温度干旱指数。下同。

图4 2001—2022年吐鲁番市TVDI年际变化和干旱程度分级变化

Fig. 4 Inter-annual variation of TVDI and grading change of drought degree in Turpan City from 2001 to 2022

分析，近20 a年来吐鲁番市干旱化程度增加，TVDI值以0.0047·a^{-1}的速度上升，在2003、2008、2012年以及2021年均出现局部下降，总体呈上升趋势，重旱区的比例最大，中旱区次之（图4b）。从2001—2008年之间，吐鲁番市以重旱区和中旱区为主，但自2009年，吐鲁番市中旱区的面积明显下降，重旱区面积占比呈现绝对的优势。此外，从长时间序列变化角度，各年年均TVDI变化情况主要是受到中旱区面积占比变化影响，且呈现负相关，TVDI值的上升往往伴随中旱面积占比的下降 。

2.4　2001—2022年TVDI月际变化分析

对吐鲁番市2001—2022年4—10月植被生长期的TVDI均值重分类得到月际干旱等级分布图（图5a）。TVDI随月际变化呈非规律性波动，5月为吐鲁番市干旱程度最为严重的一个月（图5b），此后温度回升，冰雪消融，植被开始迅速生长发育，6月的植被指数便可超过0.1[29]，与该月TVDI值明显的下降，中旱面积占比的上升相吻合，而7—9月TVDI值呈现略微上升，结合吐鲁番市年内温度变化，相对过高的温度对植被的增长起到一定的抑制作用。在10月时，TVDI达到最低点，此时正值秋季，当地气温开始逐步下降，地表水分蒸发量同时下降，研究区植物生长速率放缓，其生长的水分需求量同步减少，加之高海拔地区存在降雪融化水分，使土壤含水量增加，TVDI下降[30]。

2.5　影响因素分析

参考相关文献中对干旱影响因素的选取[24]，综合考虑气象、地形、人类活动因素对研究区干旱变化的影响，本研究选取吐鲁番市2001—2022年年均潜在蒸散发、年均气温、年降雨量、高程、坡度、人口密度、土地覆被类型作为自变量，探究吐鲁番市干旱化主要影响因素。利用ArcGIS 10.8软件，对自变量以及各影响因素进行网格采样点数目选择，进行采样点信息提取以及地理探测器分析，得到各影响因素对于吐鲁番市干旱程度时空分布的因果影响程度（表2）。

因子探测结果表明，全部因素均通过显著性检验（P>0.05），可作为影响因素对吐鲁番市干旱空间变化进行分析。吐鲁番市干旱变化趋势影响比重最大因素为潜在蒸散发、气温和高程，其q值分别为0.906、0.880、0.870。基于相关研究[31]，吐鲁番近40 a来，平均无降水日约高达352 d，约占全年总天数的96.5%，加之水资源来源主要为河流供给和地下水供给[32-33]，造成降雨量在单因素探测结果中q相对较低。此外，吐鲁番市土地覆被类型占比最多为未利用地[34]，其中占比89%左右，对水的需求程度变化较小且较为稳定，对当地干旱变化的影响对比于其他以耕地以及农田为主的地区相对较小。同时，吐鲁番盆地夏季存在聚热作用，造成气温的上升，且地势不同地区温度差异明显，同时影响研究区潜在蒸散发，从而使得高程因素对当地干旱变化起着较为重要的作用[35]。通过交互探测分析方法，构建多因素交互探测模型，从表2可知，在双因素交互作用下，相比于单因素分析，结果均表现为增强，其中

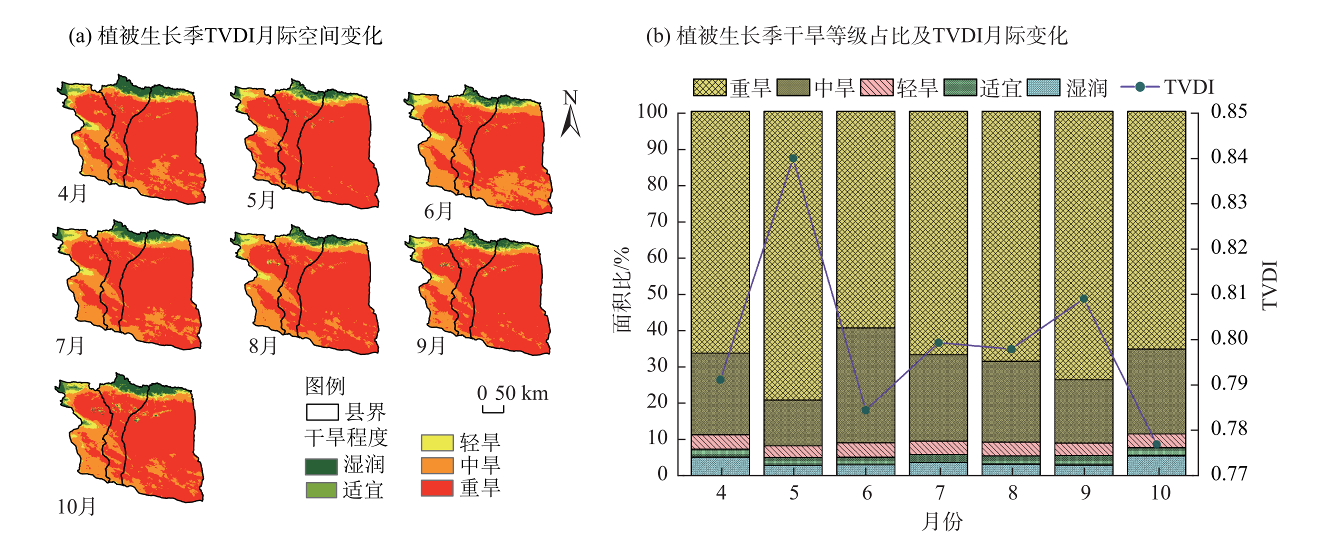


图5　2001—2022年吐鲁番市植被生长季TVDI空间分布变化及干旱变化

Fig. 5　Spatial distribution changes and drought changes of TVDI during vegetation growth season in Turpan City from 2001 to 2022

表2 地理探测器单因素与多因素交互探测结果

Tab. 2 Geo-detector single-factor and multi-factor interactive detection results

影响因子	气温	降雨量	蒸散发	坡度	高程	土地覆被类型	人口密度
气温	0.880*	0.904	0.912	0.895	0.892	0.889	0.884
降雨量	–	0.789*	0.914	0.833	0.890	0.844	0.802
蒸散发	–	–	0.906*	0.909	0.911	0.911	0.908
坡度	–	–	–	0.504*	0.882	0.684	0.514
高程	–	–	–	–	0.870*	0.884	0.875
土地利用类型	–	–	–	–	–	0.486*	0.548
人口密度	–	–	–	–	–	–	0.007*

注:*为单因素q值;其他为影响因素相互作用所得q值。

又以与潜在蒸散发交互作用的影响程度最大。潜在蒸散发与降雨量交互作用(q=0.914)对TVDI的影响最大,而坡度与人口密度交互作用(q=0.514)对TVDI的影响最小。

对研究区2001—2022年年均气温、年均降雨量和年均潜在蒸散发的变化分析,进一步探究气象因子对TVDI的影响。图6a~c结果显示,近20 a来,吐鲁番市年平均气温为9.62~11.02 ℃,多年平均气温为10.40 ℃,变化幅度为0.0086 ℃·a^{-1},呈微弱的上升趋势;年平均降雨量在7.94~12.38 mm之间,多年平均值为9.53 mm,变化率为0.032 mm·a^{-1},出现小范围下降;年均潜在蒸散发介于92.58~100.67 mm,其多年均值为96.99 mm,变化率为0.8132 mm·a^{-1},呈现微弱的上升趋势。潜在蒸散发的加剧是TVDI上升的最主要原因,降雨量的下降以及气温的升高使得吐鲁番市干旱化程度加剧。

3 讨论

本研究以像元单位尺度对吐鲁番市时空变化特征进行分析,近20 a吐鲁番市TVDI总体呈现上升趋势,但变化并不显著。有研究表明[36],由于气温的增温趋势加之年降雨量的减弱趋势,使得吐鲁番市相对湿润指数进一步减小,加剧了气候干旱化态势,表现为鄯善县最强,高昌区次之,托克逊县相对较弱,这与本研究由干旱指数TVDI值变化所得出的结论相一致。此外,吐鲁番市TVDI总体上随季节的更替出现不同起伏变化,干旱等级呈现为春季的干旱特征最为明显,其次为秋季干旱程度较为突出,夏季之于前两者干旱趋势相对较弱,该结果与当前气候变化有关,5月时冰雪并未融化,此后随着气温回暖,植被生长迅速,TVDI值下降,干旱状态得到缓解,此后,气温进一步升高造成干旱加剧,但伴随冰雪融化,水资源供给增加使得在10月干旱情况得到好转[29]。结合邓兴耀等[37]的研究,潜在蒸散和气温是导致吐鲁番市干旱加剧的主要原因,相比于一般研究结果中降雨量为干旱加剧最大影响因素存在出入,参考吐鲁番市年降雨量变化可知[32],近乎全年无降水日以及主要水源为河流与地下水供

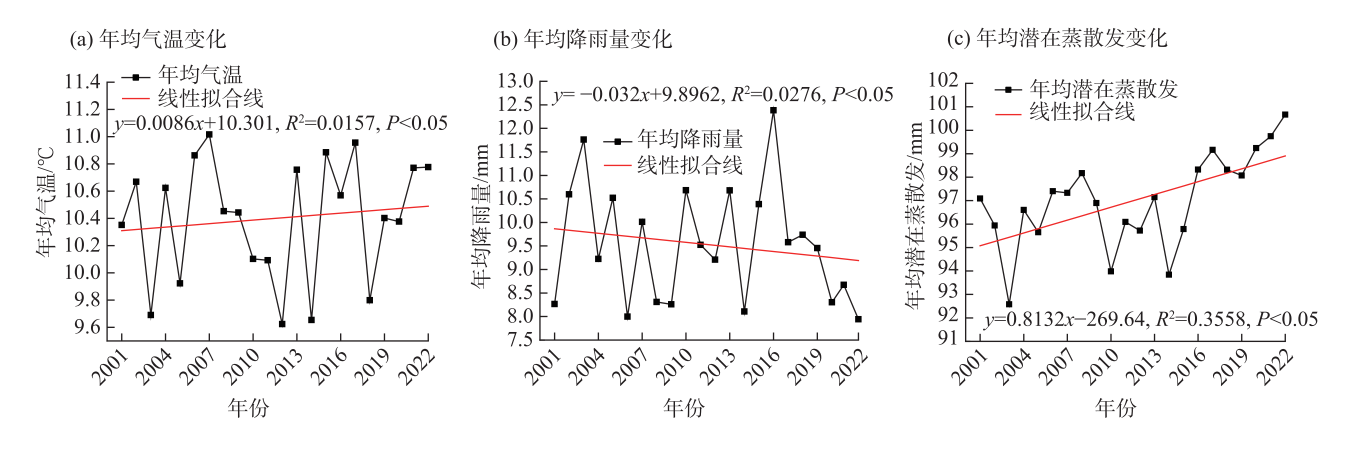


图6 气象因素年际变化

Fig. 6 Interannual variation of meteorological factors

给导致降雨量影响占比相对下降。

本研究应用TVDI模型对新疆吐鲁番市的干旱时空分布进行了监测，得到了较好的适应性结果，但单一指数并不能完全符合，所以未来可以考虑构建一个综合干旱指数，对研究区的干旱状况进一步讨论分析，同时可以利用其他植被干旱指数（EVI）、改进的温度-植被干旱指数（iTVDI）、干旱严重度指数（DSI）[38-39]等进行对照验证。此外，为进一步探索适合新疆吐鲁番市旱情空间分布的优化方法，需要与其他干旱影响因子相结合，以提高研究的精度和有效性。

4 结 论

本研究以新疆吐鲁番市2001—2022年为研究对象，利用遥感数据（MODIS/CLDC），计算不同时空尺度上的TVDI，分析近20 a来该地区干旱时空变化特征；采用地理探测器单因素与多因素交互分析等方法，对新疆吐鲁番市潜在蒸散发、气温、年降雨量、坡度、土地覆被类型、人口密度影响因素进行分析，得出如下结论：

（1）吐鲁番市干旱区TVDI空间分布呈现较为显著的地域特征，表现出自北向南逐渐递增的趋势，从变化趋势分析，吐鲁番市总体呈现干旱化加剧，其中有89.6%的区域TVDI呈显著增加，6.9%的区域TVDI呈现不显著增加，仅有3.5%的区域为干旱程度未有加剧。

（2）从干旱的年际变化趋势来看，在过去近20 a中，吐鲁番市干旱出现轻微加剧的趋势，其中TVDI在2022年达到峰值，干旱程度进一步加重。TVDI月际变化随季节的更替有显著变化，总体上表现为：春季>秋季>夏季的变化趋势，TVDI随月际变化分别在5月以及9月出现峰值，其中在5月TVDI达到最大值，总体呈现上升到下降的变化情况。

（3）单因素探测结果表明，潜在蒸散发、气温以及高程对于吐鲁番市干旱形成以及干旱程度加剧有着主导影响作用。在多因素交互下，潜在蒸散发分别与高程、气温、降雨量以及土地覆被类型四对相互作用为影响该地区干旱变化的重要因素。

本研究进一步揭示吐鲁番市2001—2022年全年以及植被生长季内干湿变化时空演化特征，为当地制定干旱防治措施，提高处理生态隐患和地缘风险的能力提供理论依据。

参考文献（References）

[1] 黄曼捷, 李艳忠, 王渊刚, 等. 多源遥感降水产品在西北干旱区的气象干旱性能评估[J]. 干旱区地理, 2024, 47(4): 549-560. [Huang Manjie, Li Yanzhong, Wang Yuangang, et al. Evaluation of meteorological drought performance of multi-source remote-sensing precipitation products in arid northwest China[J]. Arid Land Geography, 2024, 47(4): 549-560.]

[2] 许昕彤, 朱丽, 吕潇雨, 等. MSWEP降水产品在黄河流域气象干旱监测中的适用性评价[J]. 干旱区地理, 2023, 46(3): 371-384. [Xü Xintong, Zhu Li, Lü Xiaoyu, et al. Applicability evaluation of MSWEP product for meteorological drought monitoring in the Yellow River Basin[J]. Arid Land Geography, 2023, 46(3): 371-384.]

[3] Rouse J W, Haas R H, Schell J A, et al. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS[J]. Proceedings of the Third ERTS Symposium, 1973, 3(8): 309-317.

[4] Sandholt I, Rasmussen K, Andersen J. A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 79(2): 213-224.

[5] 陈少丹, 张利平, 汤柔馨, 等. 基于SPEI和TVDI的河南省干旱时空变化分析[J]. 农业工程学报, 2017, 33(24): 126-132. [Chen Shaodan, Zhang Liping, Tang Rouxin, et al. Analysis on temporal and spatial variation of drought in Henan Province based on SPEI and TVDI[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(24): 126-132.]

[6] 王凤杰, 冯文兰, 扎西央宗, 等. 基于FY-3A/VIRR和TERRA/MODIS数据藏北干旱监测对比[J]. 自然资源学报, 2017, 32(7): 1229-1239. [Wang Fengjie, Feng Wenlan, Zhaxi Yangzong, et al. The comparison of FY-3A/VIRR and TERRA/MODIS data for drought monitoring[J]. Journal of Natural Resources, 2017, 32(7): 1229-1239.]

[7] 杨银科, 盛强, 邵鹏鲲, 等. 基于树轮密度资料的黄河干流中部地区的PDSI序列重建[J]. 水电能源科学, 2022, 40(8): 1-4, 31. [Yang Yinke, Sheng Qiang, Shao Pengkun, et al. Reconstruction of PDSI sequence in central part of Yellow River based on tree rings density data[J]. Water Resources and Power, 2022, 40(8): 1-4, 31.]

[8] Wang H, Zhang Y, Shao X. A tree-ring-based drought reconstruction from 1466 to 2013 CE for the Aksu area, western China[J]. Climatic Change, 2021, 165(1-2): 39, doi: 10.1007/s10584-021-03021-3.

[9] Li Y Z, Zhuang J C, Bai P, et al. Evaluation of three long-term remotely sensed precipitation estimates for meteorological drought

monitoring over China[J]. Remote Sensing, 2022, 15(1): 86-86.

[10] Wang J F, Liu Z Y, Yuan Z Y, Yuan H X, et al. Impacts of reservoir operations on multi-scale correlations between hydrological drought and meteorological drought[J]. Journal of Hydrology, 2018, 563: 726-736.

[11] 陈世亮, 李霞, 钱钊晖, 等. 澜沧江——湄公河流域干旱趋势及其对生态系统碳固定的影响[J]. 地理学报, 2024, 79(3): 747-764. [Chen Shiliang, Li Xia, Qian Zhaohui, et al. Drought trend and its impact on ecosystem carbon sequestration in Lancang-Mekong River Basin[J]. Acta Geographic Sinica, 2024, 79(3): 747-764.]

[12] 武彬. 基于VIIRS-TVDI的干旱区农田土壤湿度反演方法研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2024. [Wu Bin. Study on inversion of soil moisture in arid area based on VIIRS-TVDI[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2024.]

[13] 于维, 柯福阳, 曹云昌. 基于MODIS-TVDI/GNSS-PWV的云南省干旱特征时空分析[J].自然资源遥感, 2021, 33(3): 202-210. [Yu Wei, Ke Fuyang, Cao Yunchang. Spatial-temporal analysis of drought characteristics of Yunnan Province based on MODIS-TVDI/GNSS-PWV data[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2021, 33(3): 202-210.]

[14] 余灏哲, 李丽娟, 李九一. 基于TRMM降尺度和MODIS数据的综合干旱监测模型构建[J]. 自然资源学报, 2020, 35(10): 2553-2568. [Yu Haozhe, Li Lijuan, Li Jiuyi. Establishment of comprehensive drought monitoring model based on downscaling TRMM and MODIS data[J]. Journal of Natural Resources, 2020, 35(10): 2553-2568.]

[15] Liu Q, Zhang S, Zhang H R, et al. Monitoring drought using composite drought indices based on remote sensing[J]. Science of the Total Environment, 2020, 711: 134585, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134585.

[16] Zhang Z, Xu W, Shi Z, et al. Establishment of a comprehensive drought monitoring index based on multisource remote sensing data and agricultural drought monitoring[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2021, 14: 2113-2126.

[17] 阿依加马力·克然木, 努尔巴衣·阿布都沙力克. 近52年新疆吐鲁番市气温及降水量变化特征分析[J]. 干旱区资源与环境, 2014, 28(12): 45-50. [Keranmu Ayijiamali, Abudouzhalake Nuerbayi. Analysis of temperature and rainfall changes in recent 52 years in Turpan City, Xinjiang[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2014, 28(12): 45-50.]

[18] 匡昭敏. 基于EOS/MODIS卫星数据的甘蔗干旱遥感监测模型及其应用研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2007. [Kuang Zhaomin. Sugarcane drought monitoring models and its application with remotely sensed data from EOS/MODIS[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2007.]

[19] 刘悦. 近20年我国西部地区植被恢复时空动态及驱动力分析[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2023. [Liu Yue. Spatio-temporal dynamics and driving forces of vegetation restoration in western China in recent 20 years[D]. Xianyang: Northwest A & F University, 2023.]

[20] Yang J, Huang X. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019[J]. Earth System Science Data, 2021, 13(8): 3907-3925.

[21] 李洛晞, 沈润平, 李鑫慧, 等. 基于MODIS时间序列森林扰动监测指数比较研究[J]. 遥感技术与应用, 2016, 31(6): 1083-1090. [Li Luoxi, Shen Runping, Li Xinhui, et al. Comparison of forest disturbance indices based on MODIS time-series data[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2016, 31(6): 1083-1090.]

[22] 夏照华. 基于NDVI时间序列的植被动态变化研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2007. [Xia Zhaohua. The studies on dynamic of vegetation based on NDVI time series[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2007.]

[23] 杨曦, 武建军, 闫峰, 等. 基于地表温度-植被指数特征空间的区域土壤干湿状况[J]. 生态学报, 2009, 29(3): 1205-1216. [Yang Xi, Wu Jianjun, Yan Feng, et al. Assessment of regional soil moisture status based on characteristics of surface temperature/vegetation index space[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(3): 1205-1216.]

[24] 程小强, 周兆叶, 李旺平, 等. 基于MODIS数据的中亚地区旱情监测及影响因素分析[J]. 农业工程学报, 2022, 38(10): 128-137. [Cheng Xiaoqiang, Zhou Zhaoye, Li Wangping, et al. Monitoring drought situation and analyzing influencing factors in Central Asia using MODIS data[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(10): 128-137.]

[25] 苟爱萍, 张振, 王江波. 基于POI视角的上海城市功能区演化特征及驱动因素[J]. 资源开发与市场, 2022, 38(9): 1052-1062. [Gou Aiping, Zhang zhen, Wang Jiangbo. Evolution characteristics and driving factors Shanghai urban functional area based on POI perspective[J]. Resource Development & Market, 2022, 38(9): 1052-1062.]

[26] 高晓彤, 赵林, 贾建琦. 包容性绿色发展的时空演变与驱动因素——以山东省为例[J]. 开发研究, 2021(5): 24-31. [Gao Xiaotong, Zhao Lin, Jia Jianqi. Spatial-temporal evolution and driving factors of inclusive green development: Taking Shandong Province as an example[J]. Development Research, 2021(5): 24-31.]

[27] 张学渊, 魏伟, 周亮, 等. 西北干旱区生态脆弱性时空演变分析[J]. 生态学报, 2021, 41(12): 4707-4719. [Zhang Xueyuan, Wei Wei, Zhou Liang, et al. Analysis on spatio-temporal evolution of ecological vulnerability in arid areas of northwest China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(12): 4707-4719.]

[28] 徐娜, 丁建丽, 刘海霞. 基于NDVI和LSMM的干旱区植被信息

提取研究——以新疆吐鲁番市为例[J]. 测绘与空间地理信息, 2012, 35(7): 52-57. [Xu Na, Ding Jianli, Liu Haixia. Extraction of vegetation information in arid area based on NDVI and LSMM: A case study of Turpan[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2012, 35(7): 52-57.]

[29] 齐述华, 王长耀, 牛铮. 利用温度植被旱情指数(TVDI)进行全国旱情监测研究[J]. 遥感学报, 2003, 7(5): 420-427. [Qi Shuhua, Wang Changyao, Niu Zheng. Evaluating soil moisture status in China using the temperature vegetation dryness index (TVDI)[J]. Journal of Remote Sensing, 2003, 7(5): 420-427.]

[30] 吴越. 吐鲁番盆地地表蒸散量估算与植被演化特征研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2013. [Wu Yue. The evapotranspiration estimation and evolution characteristics of vegetation in Turpan Basin[D]. Beijing: China University of Geosciences Beijing, 2013.]

[31] 王芳, 马红, 熊友良. 吐鲁番市干旱气候特征及人工增雨工作开展[J]. 农家参谋, 2019(19): 141. [Wang Fang, Ma Hong, Xiong Youliang. Arid climate characteristics and artificial precipitation work in Turpan City[J]. Farm Staff, 2019(19): 141.]

[32] 郭江浩, 黄佛君, 刘博, 等. 近47年吐鲁番盆地人工绿洲精明增长的时空过程分析[J]. 江西农业学报, 2024, 36(1): 76-86. [Guo Jianghao, Huang Fujun, Liu Bo, et al. Spatiotemporal analysis of smart growth of artificial oasis in Turpan Basin in recent 47 years [J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2024, 36(1): 76-86.]

[33] 秦国强. 吐哈盆地地下水演变规律及趋势研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2023. [Qin Guoqiang. Research on evolution law and trend of groundwater in the Turpan-Hami Basin[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2023.]

[34] 冶建明, 谢斯琦. 吐鲁番市土地利用转型及生态服务功能交叉敏感性研究[J]. 草业科学, 2024, 41(9): 2164-2180. [Ye Jianming, Xie Siqi. Cross-sensitivity analysis of land-use transformation and ecosystem service functions in Turpan City, China[J]. Pratacultural Science, 2024, 41(9): 2164-2180.]

[35] 张新庆. 吐鲁番盆地地形与天气[J]. 新疆气象, 1998(6): 11-13. [Zhang Xinqing. Topography and weather in Turpan Basin[J]. Xinjiang Meteorology, 1998(6): 11-13.]

[36] 曹兴, 万瑜, 胡双全, 等. 干旱条件下吐鲁番盆地相对湿润指数变化特征分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2013, 7(6): 42-49. [Cao Xing, Wan Yu, Hu Shuangquan, et al. Variation of relative moisture index in Turpan Basin under arid condition[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2013, 7(6): 42-49.]

[37] 邓兴耀, 刘洋, 刘志辉, 等. 中国西北干旱区蒸散发时空动态特征[J]. 生态学报, 2017, 37(9): 2994-3008. [Deng Xingyao, Liu Yang, Liu Zhihui, et al. Temporal-spatial dynamic change characteristics of evapotranspiration in arid region of northwest China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(9): 2994-3008.]

[38] Yang R, Wang H, Hu J, et al. An improved temperature vegetation dryness index (iTVDI) and its applicability to drought monitoring [J]. Journal of Mountain Science, 2017, 14(11): 2284-2294.

[39] Ali S, Tong D, Xu Z, et al. Characterization of drought monitoring events through MODIS- and TRMM-based DSI and TVDI over South Asia during 2001—2017[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019, 26: 33568-33581.

TVDI-based analysis of drought and influencing factors in Turpan City in the last 20 years

ZHOU Xiaoming, ZHANG Zhe, ZHANG Yue, WANG Yuning
(College of Geography and Remote Sensing Science, Xinjiang University, Urumqi 830017, Xinjiang, China)

Abstract: In the context of an intensifying global greenhouse effect, accurate drought monitoring is critical for ensuring regional ecological security, economic development, and agricultural production. Turpan City, a key base for grape and cantaloupe cultivation in Xinjiang and a significant transportation hub on the Silk Road in China, holds a strategic position. In recent years, water resource scarcity due to the city's geographic and climatic conditions has exacerbated drought issues, impeding the long-term and stable socio-economic development of Turpan City and its surrounding regions. This study establishes the temperature-vegetation drought index (TVDI) model using MODIS normalized difference vegetation index and land surface temperature data from 2001—2022. The spatial and temporal variations of drought in Turpan City over the past 20 years and its evolving patterns were analyzed using trend analysis, the Mann-Kendall trend test, and Geodetector methods. Additionally, the influence of various factors (including mean annual temperature, rainfall, potential evapotranspiration, land cover type, population density, elevation, and slope) on TVDI was investigated. The results indicate that: (1) The spatial distribution of TVDI in Turpan City exhibits distinct regional characteristics, with a gradual increase in aridity from north to south. Analysis of the trends reveals that the overall aridity of Turpan City has intensified, with 89.6% of the area showing a significant increase in TVDI, 6.9% showing a non-significant increase, and only 3.5% showing no increase in aridity. (2) The interannual trend of TVDI demonstrates a progressive increase in drought severity over the past 20 years, peaking in 2022. Notably, there are marked seasonal differences in the monthly variability of TVDI, generally following the order spring>autumn>summer. (3) Single-factor analysis highlights that potential evapotranspiration, temperature, and elevation are the top three factors influencing drought trends in Turpan City. Under multifactor interactions, potential evapotranspiration interacts with elevation, temperature, precipitation, and land cover to collectively drive aridification.

Key words: drought; temperature-vegetation drought index (TVDI); trend analysis; Geodetector; Turpan City